

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

市販カメラを用いた、大気エアロゾルの光学的厚さ観測の可能性

著者	小池 峻哉
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-4
発行年	2019-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00022070

市販カメラを用いた、 大気エアロゾルの光学的厚さ観測の可能性

ATMOSPHERIC AEROSOL OBSERVATION USING COMMERCIAL CAMERA

小池 峻哉

Shunya Koike

指導教員 春日 隆

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程(創生科学系)

Methods for observing aerosol optical thickness with a commercial digital single-lens reflex camera are proposed. The atmospheric optical thickness is the result of integration of scattering by fine particles in the atmosphere. In this research, we make existing methods cheaper and more popular by using a commercially available digital camera. By simplifying the observation methods that have been done in academic fields, we will be able to respond to social needs such as monitoring of soot on streets. We propose several parts in system build for spectroscopically observing sunlight with a digital camera. First, measure the frequency characteristics of the visible light 3 band output of the digital camera and evaluate the performance as the observation device. Second, we make a system to compensate for the missing part in using a commercially available camera for observation. We introduce methods and open source applications that remotely drive consumer cameras. Third, we make the process of image processing and numerical calculation for converting from image to meaningful numerical value. Finally, consider its significance from actual observation results.

Key Words : Atmosphere, Aerosol Optical Thickness, Digital Camera

1. はじめに

地球大気の中には、いわゆる空気と呼ばれる物質以外にも、様々な微粒子が分散系として存在している。これを大気エアロゾルという。近年において、黄砂、PM_{2.5}、花粉といったこれら大気中の微粒子について、社会的関心が高くなりつつある。この要因として大きく挙げられるのが、健康思考の高まりであろう。また目に見えない微粒子という意味では、東日本大震災における原発事故による放射性物質の拡散も注目され、一般市民が放射線量計を買い求めるという事態となった。

大気エアロゾルの観測は現状、大学や政府機関における学術的研究として行われているものである。他の気象現象に比べ観測地点が驚くほど少なく、予報システムの大半は風等からの数値シミュレーションを主としている。この手法は、黄砂の移動のような大陸規模の現象を精度良く計算している一方、狭い範囲における現象の解明には不利である。

これらに対する社会的関心が高まっている中において、安価で普及性のあるシステムのニーズがあると私は考える。たとえば、工場煤煙の監視や、道路における排ガス情

報、地区ごとの花粉警報などの活用法が考えられる。これらの情報の取得には、現在主流の高価格高精度の観測機器ではなく、生産性に長け安価で場所を選ばないものが必要となる。本研究ではその一例として、市販のデジタルカメラを用いた観測システムを考案し、実証実験を行った。市販カメラを用いることによって、アマチュア観測や学校教材にも普及性のあるようなシステムを目指した。

2. 理論概要

大気エアロゾルを測定する方法は大きく分けて、物質を直接採取する方法と、間接的に推定する方法の2つがある。このうち光を用いて間接的に観測するのが本研究の類するところである。

(1) 前提理論

電磁気学によると、物質に光が入射すると光と電子の相互作用によって遷移が起こり、エネルギー総量は変わらずに進行方向のみが変化する。この分極率の平均値である散乱断面積は物質の大きさと波長の関係で表されるが、大気微粒子と可視光の関係においてはレイリー散乱、ミー散乱といった式で近似される。ここで大気の透過光

を観測するという事は、大気中にて多重に散乱された結果を観測することであり、大気を通った光には微粒子の情報が含まれていると言える。

電磁気学における散乱理論は基本的に 1 つの粒子に対して入射した場合の単散乱であるが、気象観測においては道程の全ての粒子に対する多重散乱として結果が得られる。そのため気象学など分野においては、光源の方向からの直達光に対する減衰率を以下の式で近似している。

$$\tau_A = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

この τ_A を光学的厚さと言い、特にエアロゾルに対するものを AOT と表す。 α をオングストローム指数という粒子径の係数、 β を微粒子の量の係数としている。これを用いて、透過前の光と透過後の光の関係は以下の様に表される。

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-\tau(\lambda) \cdot m(\theta)) \quad (2)$$

$m(\theta)$ は路程と呼ばれるもので、透過距離を表す。気象においては垂直気柱の厚さを 1 とし、高度角による透過距離の倍率を表す。

(2) 先行研究

本研究が類する光学的エアロゾル観測は、AOT の算出を基本としている。その手段として、自然光を用いるか人工光を用いるかという点で 2 種類に大別される。

自然光として太陽光をターゲットとする観測機器は、一般にサンフォトメータ、スカイラジオメータと呼ばれ、古くから行われている手法である。

一方、人工光を用いる場合はライダー観測が主流である。ライダーとは Light Detection and Ranging の略であり、レーダーの光バージョンである。電波より波長の短い光を発振することで、小さな物体の検出を可能としている。この特徴として、位相遅れやドップラーシフト、偏光を観測することで、粒子の位置や移動や種類を推定できる。

近年では、人工衛星においてリモートセンシングによる全地球の観測が可能となった。その中には、地上局からのレーザーを人工衛星で受信するといった手法もあり、手法が多様化している中にある。

3. デジタルカメラを用いる意義と課題

本研究はサンフォトメータによる太陽直達光の観測を、市販のデジタルカメラによって代用するものである。そもそも、デジタルカメラによる撮像とは光の 3 原色に相当するフィルターを通した受光であり、可視光帯 3 バンドを用いた分光観測と言える。

市販デジタルカメラを用いる理由としては、前述した一般への普及性が挙げられる。現代におけるカメラは、受光装置として以外にも画像処理技術やネットワーク技術が安価にパッケージ化された製品である。これを利用することは、部品レベルから安価で高精度なものを目指す事とは別のアプローチとして有意義であると考えられる。

市販カメラを用いる点において最も考慮しなければならないのは、カメラが出力するのはあくまで色情報とい

う点である。色情報では、受光素子自体の出力に対してそれを規格化するための様々な補正がなされている。これを解決するには、科学的な知識だけではなく色彩学的見地も必要となる。デジタルカメラの種類によっては素子出力をそのまま量子化した RAW 形式を扱うことが出来る機種も存在するが、本研究では市販カメラを扱うことの意義として色空間変換後の一般的な画像形式を用いるものとした。

AOT 観測に限らずコンシューマ向けのカメラを測定機器として用いる事例は存在するため、この論文においてはシステム設計における課題を中心として述べる。まず、デジタルカメラが持つスペクトルへの応答特性の測定である。次に、市販カメラが自動機能として持ち得ない部分に対する制御システムの設計手法である。最後に、画像データを一意な数値とする変換手法を述べる。いずれの過程においても、基礎研究分野の知見を用いつつ簡素化した手法で行うことを目標とする。

4. 観測システムの構築

(1) カメラの受光素子としての応答

カラーの撮像が可能なデジタルカメラの撮像素子には、RGB に相当する 3 つのフィルターが置かれている。このフィルターを通して出力される一般に(3)式で表される。

$$X = \int_0^\infty I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

可視光カメラにおけるフィルターとその後の信号処理の過程では、人間の目に合った画像を出力するための $\bar{x}(\lambda)$ が設計されている。色空間としてのこの出力値は、メーカーや機種による差異や内部設定による変化を持つ。本研究において使用した NikonD7200 デジタルカメラについて、 $\bar{x}(\lambda)$ に影響を及ぼす設定を固定として RGB それぞれに対する感度特性を測定した。

表 1 カメラの構成と設定

カメラ	ニコンD7200	フィルター	
レンズ	AF-S NIKKOR 85mm 1:1.8 G	Kenko ZX ND16	
		Kenko PRO ND1000	
設定値			
ISO	100		
絞り	任意		
シャッター速度	任意		
ホワイトバランス	晴天(5200K)		
画質モード	FINE		
画像サイズ	6000 × 4000		
ファイル形式	JPG		
色空間	sRGB		
その他補正機能	OFF		

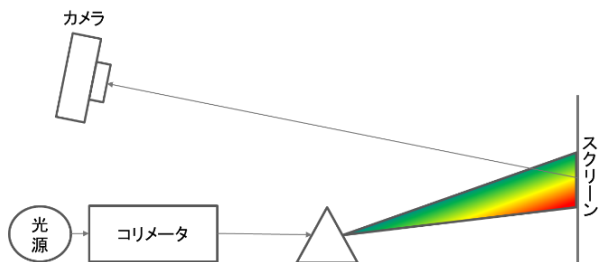


図 1 デジタルカメラの周波数応答測定法

計測については、簡素化のためにプリズムと各種光源を用いた装置を考案した。この装置によって白熱電球光を分光し、スクリーン上の座標に対する画像出力特性を作製する。その後、レーザー光、LEDといった波長帯域が狭い光源を用いて座標に対する波長の基準点を設定することで、波長特性を導出する。その結果を以下に示す。このRGBについて、輝度に対して線形性を持った値を示すために、元の値を $255 \times (R/255)^{2.2}$ している。これはカメラ内の色変換過程に対する理論からの逆補正である。

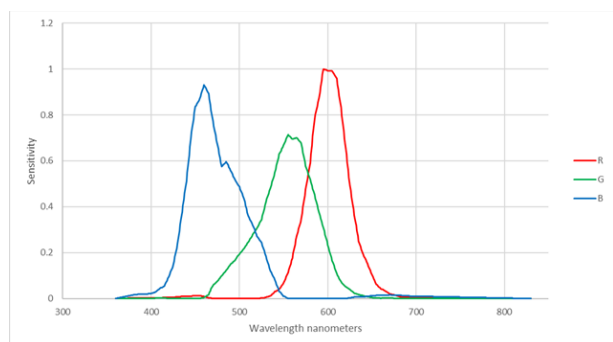


図2 色と周波数の応答

この応答関数は正規分布的でないため、RGBそれぞれを周波数へ換算するにあたり2つの方法が考えられる。

表2 RGBと周波数の換算

	R	G	B
平均波長(nm)	600	553	478
ピーク波長(nm)	595	555	460

(2) 市販カメラを用いた定点観測システム設計

観測を自動的に行うため、市販のデジタルカメラ、組み込み制御用のLinuxPC、エンドポイントとしての汎用PCの3点を中心としたシステムを構築した。以下の図がシステムの概要である。

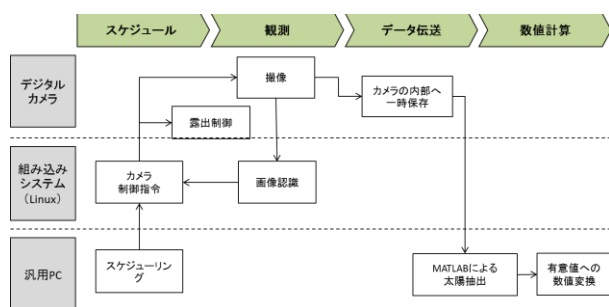


図3 観測システムのプロセス

組み込みシステムでは、シングルボードコンピュータ Raspberry Pi をLinuxOSにて駆動し、フリーソフトであるgPhoto2およびlibphoto2ライブラリによってカメラの遠隔制御を可能とする。

組み込みシステムにて行う作業は主に2つある。1つは、定点観測用にあらかじめ決められたスケジュールで撮影する機能の付加である。これについては、制御指令プ

ログラムを常駐し時間呼び出すことで簡単にできる。2つ目は、カメラの露出制御である。一般的な画像で用いられている8ビット256階調の値は色の飽和、不足が生じやすくこまめな露出制御が必要である。しかし、市販カメラの露出制御機構では太陽直達光と周辺光の圧倒的な輝度差を認識できず、露出過多を引き起こしやすい。これは広角レンズを用いて視野内の太陽が小さくなるほど顕著であり、これに特化した露出制御が必要となる。この実現には、撮影画像を組み込みコンピュータに取り込み、太陽位置のピクセルの最大値と最低値を検出してそれに見合った露出制御をすればよい。太陽撮影においては太陽が視野内の最大輝度となるのは自明であるため、複雑な検出手法は必要とされない。このプロセスをインターバル撮影の合間にも挟むことで、薄雲等による急激な輝度変化へも対応できるようにした。

(3) 画像の数値データ化

観測された画像から、推定されるAOTデータとなるまでには、以下のプロセスを踏んでいる。

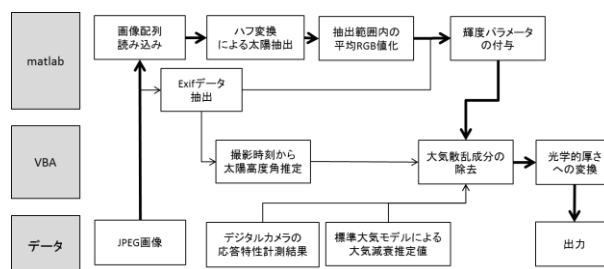


図4 画像からデータ化のプロセス

画像から太陽の抽出には、ハフ変換を用いた円検出プログラムを使用している。ここで抽出された太陽のピクセル値を平均し、画像ファイル内に格納された設定パラメータや図1の感度特性を用いて輝度値へ変換する。また、エアロゾルに対する光学的厚さの導出のため、標準大気モデルを用いた大気透過率の数値計算を用いて空気による散乱成分を除去した。この輝度値を対数化し、太陽高度角による大気路程（鉛直気柱を1とする透過距離）換算を加えることでAOTが導出される。

5. 観測結果とその有意性

観測は法政大学小金井キャンパス西館屋上で行った。なお、太陽追尾装置を用いていないため南西方位に仰角12°程度で固定し、午後の時間帯の観測を行った。

表3 観測地の座標

緯度	35°42'35"N
経度	139°31'19"E
標高	90m

観測データを上記プロセスにてAOTへ変換し、日による平均としたものを以下に示す。

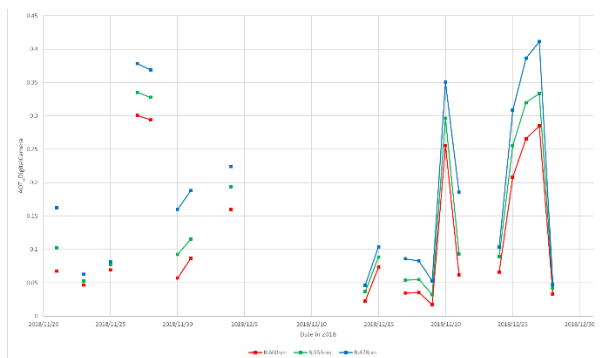


図 5 日平均観測 AOT

図は 2018 年 11 月 21 日から 12 月 28 日までの観測から、日平均観測 AOT を RGB それぞれの波長に対し示している。空白は雲による観測不可日である。

このデータの優位性の検証に当たり、千葉大学 CEReS 提供のスカイラジオメータ観測データとの比較を行った。関東平野内において東へ約 50km 離れた千葉県千葉市の 500nmAOT 観測値との線形回帰を行ったところ、0.8～0.85 の相関関係が得られた。一方、千葉市と、千葉市から北へ約 50km 離れた茨城県つくば市の観測データの観測データの間における相関は 0.85 程度であった。これにより、関東平野内において 50km 離れた地点における観測値の相関として、市販カメラによる観測にはある程度の信頼性が与えられるものであると考える。

一方、本実験の観測結果と千葉市データの線形回帰における傾きからは R:1.15 倍、G:1.37 倍、B:1.50 倍の値となっていることが想定された。これは、観測地や観測時刻の違いによる気象的な要因を考慮しても一括的に高く算出されていると言える。この要因として、カメラの感度測定における誤差の可能性が挙げられる。今回の感度測定法においては、分光法により各波長における相対感度比の測定を精密に行ったが、光源の輝度が不明であったために絶対的感度値については多くの推定を含んでいる、これについては、より厳密な測定が求められるといえる。

6. まとめと今後の展望

大気中エアロゾルに対しての社会的な関心が高まって

いる中において、コンシューマ製品を用いた観測システムの実験を行った。結果として、変動観測については一定の信頼性が確認され、大気警報装置等への応用等が期待される。一方で、物理量としての AOT 算出に対してはより高精度の特性計測と数値補正が必要とされ、この点に対しての予算的圧縮は課題である。しかし、市販カメラ自体は安定性として良好であり、本質の精度不足には至らない観測装置であると思われる。

最後に、この実験の意義として唱えた費用面について述べる。細かい点については大学に所属する恩恵を受けてはいるが、カメラ周辺機器が十数万円、制御システム用コンピュータ系が 1 万円、応答計測に関わる部分が 1 万円ほどである。デジタルカメラを所有していれば数万円から手を出せる手法であり、アマチュア観測や教育現場における活用にも期待したい。今後プログラムの部分については、権利上の事を踏まえて再編した上で一般公開出来ればと考えている。

参考文献

- 1) M. Saito and H. Iwabuchi, : A new method of measuring aerosol optical properties from digital twilight photographs, Atmos. Meas. Tech.,8, 4295–4311, 2015
- 2) Orietta Lanciano* and Giorgio Fiocco : Nighttime measurements of atmospheric optical thickness by star photometry with a digital camera, APPLIED OPTICS, Vol. 46, No. 22, 2007
- 3) Jan Ebr et al. : Aerosol Measurements with the FRAM Telescope, AtmoHEAD 2016, EPJ Web Conf. Volume 144, 2017
- 4) CEReS : SKYANET
<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/>
- 5) 気象庁 : 黄砂・エロゾル
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/kosahp/aerosol.html>
- 6) 芝田たける、福江 純 : 「連載 天体色彩学入門」, 天文教育, vol.20 No.1,2,3 vol.21 No.1,3,4, 天文教育普及研究会, 2008-2009
- 7) 吉野文雄 : レーダ水文学, 森北出版, 2002